

鋼橋塗替え塗装における新塗膜厚管理方法

保全施設部 保全企画課 田島善司
(財)阪神高速道路管理技術センター 沢田拓士
ク 村田修一

要 約

鋼桁の塗替え塗装にあたって、品質管理の一環として実施している塗膜厚検査は塗装工程上、重要なウエイトをしめている。従来、塗膜厚検査は、電磁式膜厚計を用い、新桁塗装用の管理基準を準用して行ってきた。この検査方法には、測定者の人為的誤差、データ処理の煩雑さ、合否判定が長時間を要する等の弱点があった。これらを改良すると共に、検査の省力化、合理化を目的に新型塗膜厚測定器の開発を行った。新型塗膜厚測定器は、基本的に従来の電磁式膜厚計と大きく変わらず、バッテリー・小型コンピュータ内蔵の可搬式で、計測を行う計測部と計測部を制御し統計処理を行う操作部の2つの部分より構成され、一定領域の塗装面を自動的に構成・測定・統計処理値を現場で計算出できるものである。実用化にあたり、新型塗膜厚測定器の機器精度の確認実験、現地試験測定を行い、塗替え塗装の特徴である塗装面の粗さに適応できることが確認されたものである。同時に塗替え塗装の特徴を考慮し、新型塗膜厚測定器に適応した管理基準を策定したので報告する。

まえがき

阪神高速道路は高架構造を主体として、総延長143.5kmに達している。そのうち約8割が鋼橋で占められている。

鋼橋保全に塗装は非常に重要な役目をもっており、現在、年間約56,000㎡の塗替え塗装を行なっている。その塗装の良否は、使用塗料の品質・塗布量・塗装法・作業性・塗装環境等の総合的な成果としてあらわれる。現在塗装の品質を保つため、塗装工程において塗膜厚管理があり、塗料の使用量(空缶)確認と塗膜厚測定により実施されている。そのうち塗膜厚測定にあたっては、測定器具として2点調整式電磁膜厚計がある。この測定器は、塗装面を傷つけることなく、ポータブルで使い易い反面、ピックアップの押圧による測定

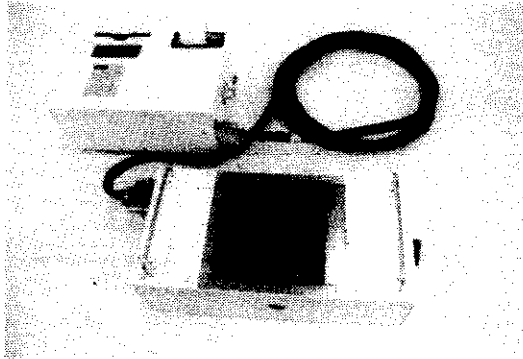
値のバラッキ、データ処理が煩雑で合否判定に長時間を要する欠点をもっている。そこで、この人為的誤差をできるだけ排除し、一定領域の塗装面を自動的に測定・校正・統計処理値を現場で計算出力できる塗膜厚測定器の開発を(財)阪神高速道路管理技術センターと共同で行った。

ここに、この塗膜厚測定器(以下、自動塗膜厚計:SCOT Inspector, Self Coat Thickness Inspector)の概要、機器精度の確認実験、現地試験測定および管理基準について述べるものである。

1 自動塗膜厚計の概要

自動塗膜厚計は、バッテリー内蔵(A/D電源可)

写真-1 自動塗膜厚計



の可搬型で塗装面に設置して計測を行う計測部（縦169×横323×高さ95mm）と、計測部を制御し統計値等の計算出力を行う操作部（縦173×横250×高さ100mm）の2つの部分より構成されている（写真-1）。

1-1 自動塗膜厚計の特長

自動塗膜厚計は、次のような4つの特長をもっている。

1) 自動計測システム

小型コンピュータ内蔵により、測定開始から終了までの一連作業がすべて自動制御される自動計測システムである。

2) 測定範囲（多点計測）

自動塗膜厚計の測定範囲は、図-1に示す

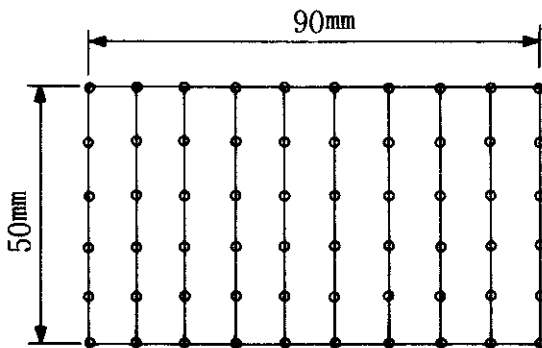


図-1 測定フォーマット

名刺大（50×90mm）の大きさで、10mmピッチの格子交点をコンピュータ制御により自動的に測定する多点計測型である。また、常に一定のフォーマットで60測点が計測されるので、従来の膜厚計に比べて測定選択上の客観性が高い利点である。

3) 現場での統計処理値の出力

自動塗膜厚計は、内蔵の小型コンピュータによって測点値の統計処理を行い、現場で膜厚の可否判定をすることができる。また、複数の測定データ間の統計処理も可能である。

4) データの保存

自動塗膜厚計での測定データは、現地でメモリーカードに記録することができ、ホスト

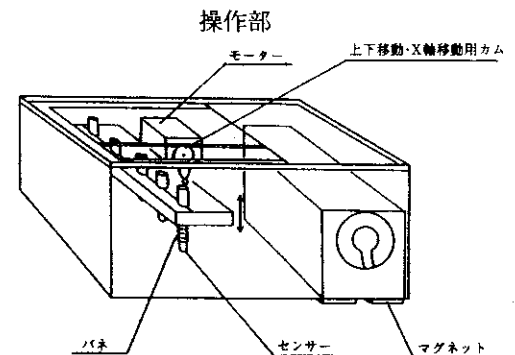
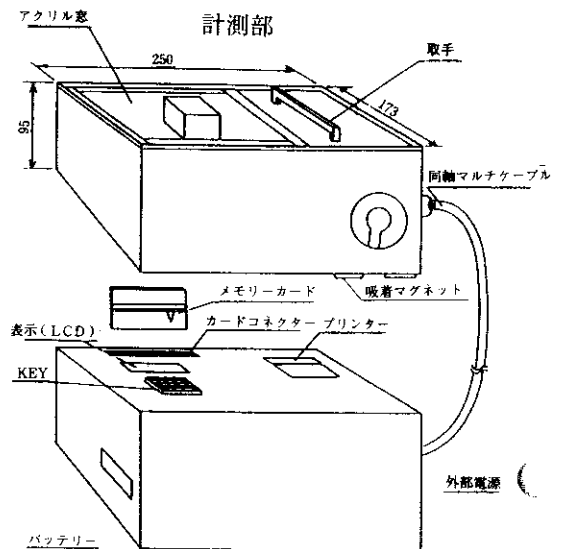


図-2 機器の名称

表-1 機器仕様

(1)計測部

センサー	非接触渦電流式センサー 5 channel
計測範囲	X=50mm Y=90mm
計測ピッチ	10mm
重量	5 kg
校正ギャップ	セラミックチップ
設置方法	マグネット1個による吸着

(2)操作部

制御装置	8 bitマイクロプロセッサー
重量	4 kg
測定分解能	1 μm
メモリー	8 kbyte カードメモリー
キーボード	50×40 (10×10mm/1個)
表示器	液晶 (LCD:20桁×4行)
プリンター	感熱 (20桁)
電源	DC12V (充電式電池 12V×1) or AC100V
接続ケーブル	5 同軸マルチケーブル

(3)各部の寸法

計測部	173(w)×250(D)×95(H)
操作部	173(w)×250(D)×95(H)

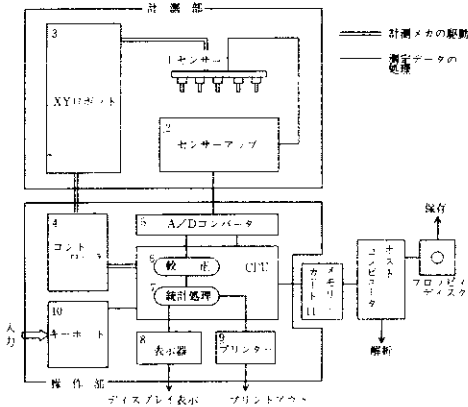


図-3 測定システム

- 1. センサー 非接触渦電流センサー 5 channel
- 2. センサーアンプ センサーにより得られた信号を増幅する。
- 3. XYロボット センサーを移動させるモーターおよびモーター駆動回路、位置センサーよりなる。
- 4. コントローラ XYロボットの制御
- 5. A/Dコンバータ 測定された「電圧」をA/D変換する。
- 6. CPU コンピューター 校正、A/D変換された電圧値を膜厚値に変換する。
- 7. CPU コンピューター 統計計算を行う。
- 8. 表示器 デイスレー 測定終了時:最大値・平均値・最小値が表示される。
- 9. プリンター 最大値・最小値・平均値・標準偏差がプリントアウトされる。
- 10. キーボード 命令・情報 (測定値・場所・日時等)の入力を行う。
- 11. メモリーカード 測定データを蓄える。ホストコンピュータへの接続が可能。

図-3 測定システム

コンピュータを通して磁気フロッピーに登録することができ、これによって大量データの保存と解析が可能である。

1-2 機器の名称と仕様

自動塗膜厚計の各部の名称と仕様を図-2 表-1に示す。

1-3 測定システム

自動塗膜厚計の測定システムを図-3に示す。

1-4 機器の詳細

1-4-1 センサー

自動塗膜厚計に使用するセンサーを選ぶにあたり、次の点を考慮した。

- 1) 移動機構に取付けて多点測定するため、センサーを機械的に移動しても精度が変わらないこと。
- 2) 計算による校正を行うため、自動的に校正ができること。(調整ツマミ等を回すのは不可)
- 3) 形状が小さく軽量であること。
- 4) 応答性(測定スピード)が速いこと。
- 5) 小さな範囲で感知できること。(点に近いほど良)

表-2 センサーの仕様

名称	GAP-SENSOR (非接触渦電流型センサー)
変換器	AEC-5505 (非接触変位計)
グローブ	PU-05 (測定範囲0~2mm)
電源	±12V ±10%

以上の点を満すものとして、非接触渦電流型センサーを採用した(表-2、は図-4)このセンサーは、高周波渦流損を応用した変位計で、「物体の静的な変位および変位の変化」、「物体の動的な変位(振動)」を物体に接触せずに精密に測定し、測定値に応じた電気信号を発生することを基本性としている。また、プローブは変換器よ

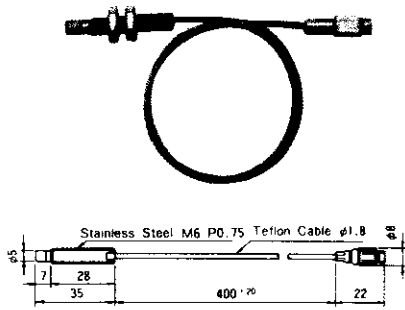


図-4 GAP-SENSOR

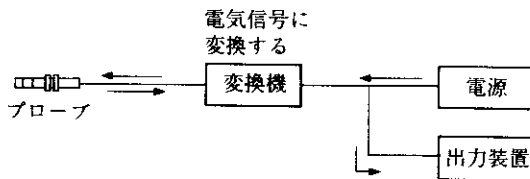


図-5 センサー基本システム

り高周波電流を受けている高周波コイルで、受感面に接近した時、そのインダクタンスが渦流損により変化する事を利用したトランジューサーである(図-5)。また、このセンサーは測定する磁性体が鉄の場合、0~2000 μ mで-5V~+5V

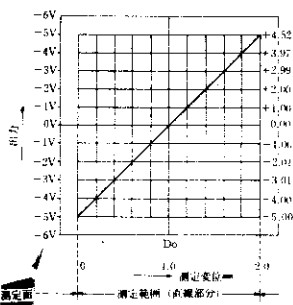


図-6 センサーの特製

の電圧するように製作され、その距離と発生する電圧との関係は直線性(校正ポイントが2点ですむ)になる特性をもっている(図-6)。

1-4-2 センサーの駆動機構

センサーの駆動は、コンピュータで制御された

XY軸をもつ機械的ロボットで行われる。X軸の移動はX軸モーターによって行い、モータ駆動回路およびX軸位置(原点・端)センサーでコントロールする。Y軸方向の移動は、1ステップのみであるためY軸モーターを設けるかわりに、ラチエットの解放によってバネの力で移動し、かつ押える構造になっている。ラチエットのセットは、測定開始前に人手で行う(図-7)。上下の移動は、図-8に示すようにモータ軸を中心にカムが回転し、センサーを固定しているベアリングの上

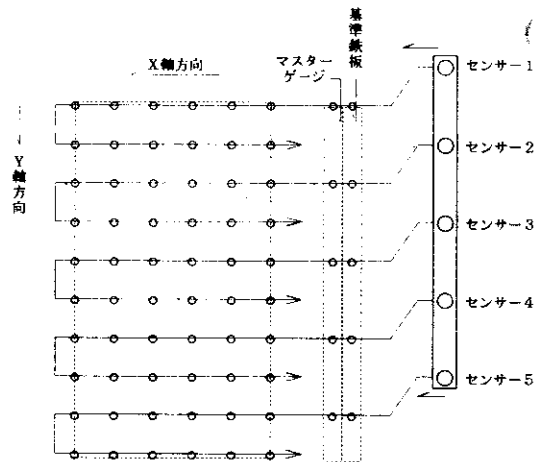


図-7 センサー駆動機構

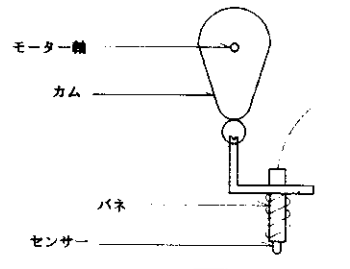


図-8 センサー接地部詳細

下移動により行われている。また、バネの圧力のみでセンサーを塗膜面に押しつける構造のため、塗装面に接地する時の衝撃は緩やかになっている。

1-4-3 校正システム

自動塗膜厚計は、測定開始スイッチ作動によって、機器内部で自動的に校正する自動校正システムである。センサー先端から磁性体までのギャッ

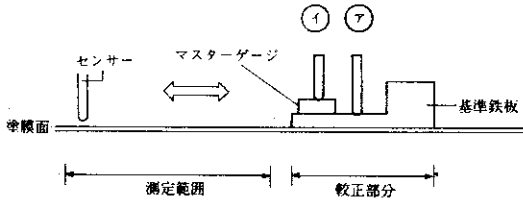


図-9 自動塗膜厚計の校正手順

プ(距離)を測定するギャップセンサーのため、校正の手順は次のように行っている。

① 基準鉄板上での電圧値の測定(図-9⑦部)センサー先端と基準鉄板の接触時の電圧値「a」とする。

② マスターゲージ厚の測定(図-9④部)センサー先端とマスターゲージ(マイクロゲージによって、あらかじめ厚みの測定されたセラミックチップ板片)の接触時の電圧値を「b」とする。③ 補正係数の算出

電圧値 a・b の差とマイクロゲージによって計られたマスターゲージの厚みの比より電圧値と距離とを関係づける補正係数 K を求める。

$$K = (b - a) l / m$$

m: マスターゲージの厚み

④ 塗膜厚の算定

測定された塗装面の電圧値「X」を K を用いて補正し、塗膜厚「t」を求める。

$$t = (X - a) / l k$$

1-4-4 制御用コンピュータ

- 1) 操作部の軽量を図るため、市販のコンピューターを使用せず、特別に製作した。システム図を図-10に示す。
- 2) キーボードの配列と機能を図-11に示す。
- 3) 測定終了後、プリンターには次のような出力ができる(図-12参)。
- 4) メモリーカードには、次のようなデータ40箇所分を入れることが可能である。各測定値(塗装面: 60測定データ + 基準鉄板面: 5測定データ + 基準厚み面: 5測定データ)測定場所(10文字)測定者(10文字)測定日・時刻(10文字), 合計値(6文字分), シリアルナンバー(1文字分)

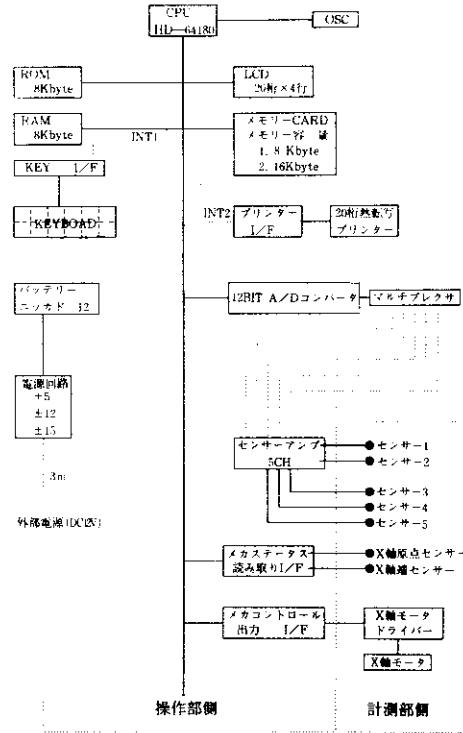


図-10 コンピュータシステム

測定開始	測定中止	設定
7	8	9
4	5	6
1	2	3
0	クリア	ENT

- ①0-9 key 数字入力キー
- ②クリアkey キー入力したデータが間違っていた場合にクリアするためのキー
- ③ENTkey 数字入力キーで入力したデータを確定するためのキー
- ④測定開始key 測定を開始させるためのキー
- ⑤測定中止key 測定を中止させるためのキー
- ⑥設定key 測定場所などを設定するためのキー

図-11 キーボード配列

計177バイト/測定データ1箇所

1マワヲ ツツイテヨク		
ツツイテヨク n8# -021		
ツツイテ 01/10/14		
ツツイテ 118 um	***マワヲ ツツイテヨク(8)***	
ツツイテ 127 um	ツツイテヨク n8# -021	
ツツイテ 14.8	ツツイテ 01/10/14	
ツツイテ 100%80%6000	ツツイテ 133 um	
ツツイテ 90%80%6000	ツツイテ 84 um	
ツツイテ 6000	ツツイテ 109 um	
	ツツイテ 11.0	

各測点での出力 合否判定出力

図-12 現場出力例

1-4-5 データの保存・解析

メモリーカードに記憶された測定データをホストコンピュータに接続し、フロッピーディスクに保存すると共に、次のような解析が可能である。

- 1) 塗膜厚値の度数分布図の出力により、膜厚値の広がりを視覚的に把握することができる。
- 2) 大量データの保存により、「作業条件」、「桁の部位ごと」等の塗製状況を統計解析し、今後の塗膜厚管理への有効資料が得られる。

2 機器の性能確認実験

自動塗膜厚計を網橋の塗替え塗装における塗膜厚測定に使用するうえで、その機器精度の確認を目的に主に既知厚みと自動塗膜厚計の測定値の比較により行い、試験片(鉄)の材質影響、表面粗さの影響などに注目し、室内実験を行った。

2-1 実験内容

測定内容とその確認のための測定項目を以下に示す。

- 1) 測定内容
 - ① センサー自身の精度。
 - ② 移動機構を含めた測定機器としての精度。
 - ③ 測定対象、環境の変化による精度。
- 2) 測定項目
 - ① 直線性(測定厚さと指示値との関係)。
 - ② 鉄板の材質による変化。
 - ③ 鉄板表面の粗さによる変化。
 - ④ 従来機器との測定指示値の比較。
 - ⑤ 測定器設置する向きによる変化。
 - ⑥ 塗装後の経過時間による変化。

⑦ 測定時の気温による変化。

2-2 試験片の仕様

試験片の仕様を次に示す。

鋼材の材質 : S S41, S M41, S M50

試験片の寸法 : 300×200×9,40×40×9

目標粗さ : 30 S 以下 (21.5~30 R_z)

(測定値)

: 50 S 程度 (43~55 R_z)

: 90 Sizyou (102~131 R_z)

ポリエステルフィルム : 50 μm, 125 μm, 188 μm
R_z : 表面粗さ (JIS B 0651) 触針式あらさ計
によって試験片表面の断面曲線を描き、この曲線

測定項目	鉄板材質	表面粗さ	測定枚数	測定回数	測定総回数
固定値の直線性(校正器)	1	1	3	5×5 ※1	7 5
(機器)	1	1	3	5×5 ※2	7 5
鉄板の材質による相違(校正器)	3	1	3	5×5 ※1	2 2 5
(機器)	3	1	3	5×5 ※2	2 2 5
鉄板の厚さによる相違(校正器)	1	3	3	5×5 ※1	2 2 5
(機器)	1	3	3	5×5 ※2	2 2 5
測定機器の相違(自動塗膜厚計)	1	1	3	(5+2)×5 ※3	1 0 5
(電圧厚計)	1	1	3	(5+2)×5 ※3	1 0 5
測定する向きによる相違	1	1	3	3×5 ※4	4 5
塗装後の経過時間による相違	1	1	1	19×15 ※5	2 8 5
気温の違いによる相違	1	1	1	4×6×15 ※6	3 6 0
合計					1 9 5 0

※1 : 測定厚さ(距離)を100,200,300,400,500 μmの5回測定する。

※2 : 測定厚さを 125,250,375,500,625 μmの5回測定する。

※3 : 測定厚さを50,188,125,250,375,500,625 μmの5回測定する。

※4 : 上向き、下向き、横向きと3方向の測定する。

※5 : 鉄板試験片を塗装し、各層において12,24,36,48時間経過ごとに測定する。

※6 : 測定厚さを50,188 μmとして、鉄板試験片を日陰と日向に設置し8時~18時までの2時間ごとに測定する。

表-3 項目別測定回数

から十点平均粗さ。

2-3 測定回数

各項目別測定回数を表-3に示す。

2-4 実験結果と考察

自動塗膜厚計に使用している渦電流型センサーは、出力電圧と磁性体までの距離の一次相関性が

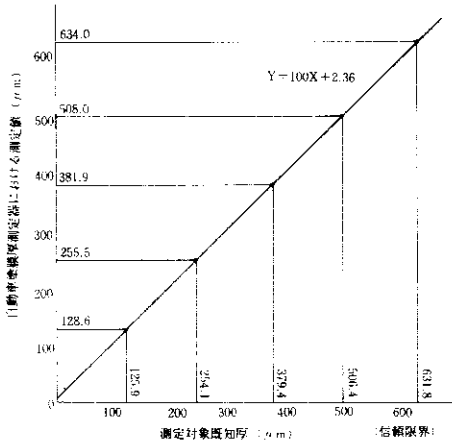


図-13 自動塗膜厚計における測定値の直線性

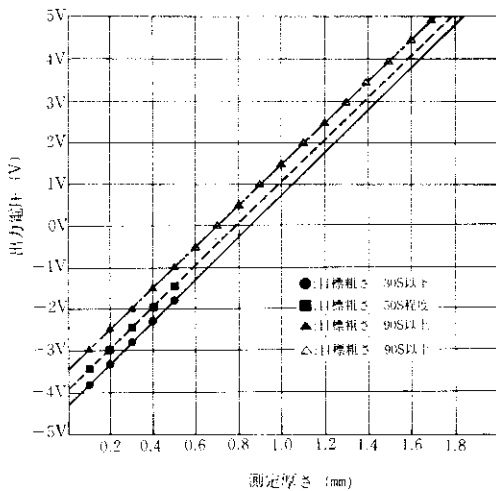


図-14 測定厚さと測定指示の関係
(鉄板粗さの影響の関係)

強く、その精度においても大変高いといえる。しかし、出力電圧から見ると材質の影響もわずかながら認められ、また、鉄板面の粗さの影響が受けやすい。

移動機に取付けたことによる精度の低下はあまり認められず、測定厚さと測定指示値との間には、図-13の通り十分な相関性が認められた。しかし、鉄板面の粗さの影響はセンサー単独の場合と同様に影響を受けやすいため(図-14参照)、統計処理時の取扱いに注意が必要である。

自動塗膜厚計の設置する向きは、下方向、横方

向、上方向の3方向について測定した。上向き測定においては標準偏差がやや大きいものの、測定指示値は誤差の範囲として扱える程度である。また、経過時間、気温の変化に対する影響もバラツキがややあるものの誤差の範囲として扱える。

なお、測定厚さが50 μ m以下の場合には、鉄板表面の粗さの影響が大きく左右するため、バラツキが大きく、塗替え塗装においては既塗膜厚が100~400 μ m程度あるため、測定には影響しないと思われる。

以上の実験結果より、自動塗膜厚計を塗膜厚の測定に使用しても支障がない結果となっている。

また、従来から使用されている電磁式膜厚計との比較は、電磁式膜厚計の校正点近防の膜厚では自動膜厚計の処理値と同程度である。しかし、校正点から離れると差違が見られる。自動塗膜厚計は2点校正を行って、直線性を確保していることから、より信頼性が高いといえる。

3 現地試験測定

室内実験において、自動塗膜厚計のセンサーおよびセンサーを含めた測定機器としての精度が確認されたため、これを実橋の塗替え工事において塗膜厚測定を行ない、塗膜厚の分布状況を調査し、塗膜厚管理基準の検討資料を得ると共に、機器の特徴に合った検査方法、実施面での問題点を得るために行った。以下に測定結果をまとめた。

1) ケレン後の塗膜表面は一定ではない。

ケレンおよび清掃後の表面は、鉄面の露出、汚れ等が十分に落されていないなどの状態であった。そのため、塗替え時の被覆厚は不均一であった。

2) 塗替え塗装の膜厚は、ほぼ標準膜厚を確保されている。

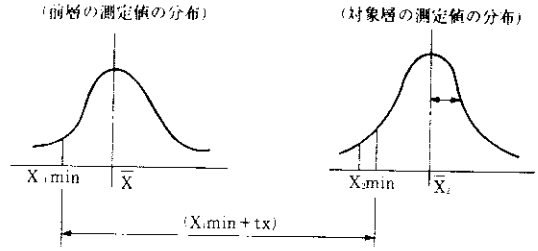
ケレン後の被覆膜厚は不均一であるが、塗装はその表面にそって塗られており、そのため不均一性(表面粗さ)が上塗りの測定値にまで影響を及ぼしていると考えられる。ただし、測定箇所毎の膜厚は一径間内ではほぼ一定であった。

- 3) 測定箇所毎および一径間内の標準偏差は、ウェブ面で20~40程度であった。下フランジ上下面では、30~60程度であり、ウェブ面以外は現行管理基準の標準偏差の管理限界（平均膜厚の20%以内）を満たしていないデータが多かった。
- 4) 桁構造の相違による塗膜厚の変化はなかった。
- 5) 測定部位による塗膜厚の状態に差があった。

比較的楽な作業姿勢の取りやすいウェブ面の塗膜厚、標準偏差は一定しているが、下フランジ上下面に関しては、測定箇所により変動が大きくあらわれていた。

4 管理基準

これまでの管理基準は、新設桁用の基準（鉄素地面が基になるため、塗装表面の塗膜厚のパラッキで塗装の施工状態の良否が判定可能）を適用してきた。塗替え塗装の場合は、部位による劣化度が異なり、またケレン等により表面が粗されるため、塗替え基層面は不均一であることを考慮しなければならない。また、塗装の各工程毎に測定を行うが、同一箇所での測定では施工者の作為が入るため、無作意な抜き取りによる測定値を統計的な推論により塗膜厚を推定することが必要である。そこで、統計的推論の手法として、JIS Z 9051-1963 [母平均の区間推定（標準偏差未知）] を適用する。この考え方は、母集団の標準偏差がわかっていない場合に、母集団から得られた測定値に基づいて、母集団の平均を含むことの確率が例えば95%になる信頼区間（上側信頼限界と下側信頼限界によって定められる）を求める方法を規定したものである。この方法は、平均値（ \bar{X} ）の分布がかなり正規分布をすることで取扱っているが、サンプルの大きさ（ n ）が大きくなれば、ロッドの特性値（ x ）の分布がかなり正規分布より離れていても、その平均値は漸近的に正規分布に近づくとするものである。ただし、JIS Z 9051より求められた信頼率は、基本的にパラッキの指標と考



$X.min$: 前層の測定値の推定最小値 \bar{X} : 前層の測定値の推定平均値
 $X.min_2$: 対象層 \bar{X}_2 : 対象層
 tx : 設計基準膜厚 σ_2 : 対象層の標準偏差

①パラッキに対する保障

$$(X.min + tx) - X.min > 0 \dots \text{不良率算出}$$

$$(X.min + tx) - X.min < 0 \dots \text{安全率100\%} \dots (1 - P) > 0.8$$

$$u = \frac{(X.min + tx) - X.min}{\sigma_2} \text{ より正規分布表より}$$

不良率Pを算出

②平均値に対する保障

$$\frac{(\bar{X}_2 - \bar{X})}{tx} > 0.8$$

※前提条件

測定時期：膜厚測定時の塗膜の乾燥状態は硬化乾燥以上とする

測定箇所：ウェブ面を主として、他の部材については必要に応じて測定する。

測定箇所数：同一工事、同一塗装系、同一塗装方法により塗装された、1径間及び1橋脚毎に8箇所（1箇所当たり60点測定し、上下5点をカットしたものを1箇所当りの測定値とする。）を標準とする。

図-15

られるため、量的な指標として標準膜厚に対する塗布量の割合も管理基準に取り入れることにより、塗替え塗装の膜厚管理が可能である。ただし、JIS Z 9051は、前層の平均値とパラッキからの推定であり、また、塗膜厚の塗布状態が桁の箇所毎に違うことを考えれば、ある程度の幅をもたし、その判定規準の規準ラインを従来を参考のうえ、現地試験測定結果から判断し80%とした。

また、自動塗膜厚計の性能確認実験から、鉄板表面の粗さが大きい場所では測定指示値に大きな影響があるため、活膜上を測定する必要がある。

この管理基準に関しては、当公団の桁の状態（活膜がほとんど残った状態：活膜までケレンの必要な箇所は塗替え塗装桁面積の15%以下）に適用可能である。

あとがき

昭和63年度より、阪神高速道路管理技術センター

において、自動塗膜厚測定器による現地測定を実施している。今後は、実橋での使用状況を踏まえ、機器の改善及び集積データの解析により必要に応じて管理基準の見直しが必要と思われる。

最後に、「鋼橋塗装・塗膜厚測定に関する調査研究委員会」の委員各位に深謝の意を表わすとともに、今後、阪神高速道路管理技術センターには益々の御協力をお願いする次第である。

参考文献

- 1) 鋼橋塗装・塗膜厚測定に関する調査研究業務報告書：昭和63年3月